

Всероссийская открытая научная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн» - «Муром 2021»

**Фактор влияния неотклоняющего поглощения на пороги возбуждения ионно-акустических и ленгмюровских волн в высокоширотной F области ионосферы**

Т.Д. Борисова, Н.Ф. Благовещенская, А.С. Калишин

ФГБУ «Арктический и антарктический научно исследовательский институт»  
199397, г. Санкт-Петербург, ул. Беринга, д.38.  
E-mail: borisova@aari.ru

*Представлены результаты исследований порогов возбуждения инициированных нагревом плазменных и ионных линий в F-области высокоширотной ионосферы, возбуждаемых мощными радиоволнами обыкновенной и необыкновенной поляризации КВ нагревного комплекса EISCAT/Heating по результатам экспериментальных измерений радаром некогерентного рассеяния и численных расчетов.*

*Ключевые слова: модификация ионосферы, пороги возбуждения, ионно-акустические и ленгмюровские волны*

**Influence factor of nondeviative absorption on the excitation thresholds of ion-acoustic and Langmuir waves in the high-latitude F region of the ionosphere**

T.D. Borisova, N.F. Blagoveshchenskaya, A.S. Kalishin

*Arctic and Antarctic Research Institute*

*Results concerning the excitation thresholds of HF-enhanced ion and plasma lines in the high latitude ionospheric F-region, induced by the ordinary and extraordinary HF pump waves, are presented. Results are based on the data obtained in the course of EISCAT/Heating experiments with the use of the UHF incoherent scatter measurements and numerical calculations.*

*Keywords: high-latitude ionosphere, excitation thresholds, ion-acoustic and Langmuir waves*

При модификации ионосферы мощными КВ радиоволнами обыкновенной (О-мода) и необыкновенной (Х-мода) поляризации в областях резонансного взаимодействия формируется ряд неустойчивостей, которые вызывают существенные изменения параметров и поведения ионосферной плазмы [1, 2]. Вблизи резонансных высот КВ радиоволн в ионосфере возбуждаются параметрические распадные неустойчивости: периодическая стрикционная (англ. parametric decay instability, PDI) и аперодическая стрикционная (англ. oscillating two stream instability, OTSI) [1, 3]. Проявления неустойчивостей PDI и OTSI непосредственно идентифицируются по данным измерений радара некогерентного рассеяния радиоволн (НР). Радары НР, пространственно совмещенные с КВ нагревным стендом, обеспечивают прямые измерения продольных плазменных волн, такие как ленгмюровские и ионно-акустические [3, 4]. В нагревных экспериментах ленгмюровские и ионно-акустические плазменные волны проявляются в спектрах радара как инициированные нагревом плазменные линии (англ., HF-induced plasma lines, HFPL) в высокочастотном канале измерений радара и усиленные ионные линии (англ., HF-enhanced ion lines, HFIL) – в низкочастотном канале. При О-нагреве HFPL и HFIL возбуждаются при включении нагревного стенда, пороговые мощности их возбуждения на нагревном стенде EISCAT/Heating составляют порядка 25 – 40 МВт, что соответствует значениям пороговых напряженностей электрического поля на ионосферных высотах порядка 0.21 – 0.27 В/м [4]. При низкой эффективной мощности излучения ( $P_{\text{eff}} < 200$  МВт) возбуждение параметрических распадных неустойчивостей PDI и OTSI [4] подавляется

развитием тепловой параметрической (резонансной) неустойчивости (англ. the thermal (resonance) parametric instability) ТПИ [5], ответственной за генерацию мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей (МИИН), вытянутых вдоль геомагнитного поля.

По данным экспериментов на стенде EISCAT/Heating (Тромсе, Норвегия), определены минимальные значения электрических полей в ионосфере при О- и Х-нагреве, необходимых для возбуждения и существования в течение нагревного цикла HFIL и HFPL одновременно с МИИН [6]. Для О-нагрева выполнено сравнение экспериментальных и теоретических пороговых значений напряженности электрического поля мощной КВ радиоволны, при которых наблюдалось возбуждение искусственных ионосферных турбулентностей (тепловой, ленгмюровской и ионно-акустической) в F2 слое высокоширотной ионосферы.

В настоящей работе представлены результаты исследования минимальных значений электрического поля волны накачки  $E_{ion}$ , необходимых для генерации ленгмюровской и ионно-акустической турбулентности в F-области высокоширотной ионосферы в течение длительности нагревного цикла с учетом потерь волны накачки в нижележащих слоях.

Исследования выполнялись по данным экспериментов 2012 - 2015 г.г. на КВ нагревном комплексе EISCAT/Heating (г.Тромсе, Норвегия), когда мощная КВ волна обыкновенной (О-мода) или необыкновенной (Х-мода) поляризации излучалась в направлении магнитного зенита. В периоды нагревных циклов эффективная мощность излучения комплекса  $P_{eff}$  изменялась в режиме ступенчатого повышения/снижения  $P_{eff}$  от 4 (56) до 580 МВт. Анализ проведен по данным измерений радара некогерентного рассеяния (НР) на частоте 930 МГц и станции вертикального зондирования ионосферы ВЗ, пространственно совмещенных с нагревным комплексом, и результатам численных расчетов.

**Расчет затухания.** Распространение радиоволны в ионосфере сопровождается потерей части ее энергии, которая преимущественно переходит в тепловую. Следствием этих потерь является затухание, т.е. уменьшение амплитуды поля волны. Расчет напряженности электромагнитного поля волны накачки  $E_{ion}$  на ионосферных высотах слоя F2 нагревного стенда EISCAT/Heating определяется выражением [3]

$$E_{ion} \left[ \frac{V}{m} \right] = \frac{0.25 \sqrt{P_{eff} [kW]}}{h [km]} \cdot e^{-A}, \quad (1)$$

где  $h$  – высота расположения возмущенной ионосферной области от поверхности Земли,  $A$  – потери напряженности радиоволны в децибеллах на пути распространения  $s$ , рассчитываются как

$$A = -8.68 \int \omega/c \chi \cdot ds. \quad (2)$$

Показатели преломления  $n$  и поглощения  $\chi$  имеют выражение [7]

$$n = \sqrt{\frac{\varepsilon}{2} + \sqrt{\left(\frac{\varepsilon}{2}\right)^2 + \left(\frac{2\pi\sigma}{\omega}\right)^2}}; \quad \chi = \sqrt{-\frac{\varepsilon}{2} + \sqrt{\left(\frac{\varepsilon}{2}\right)^2 + \left(\frac{2\pi\sigma}{\omega}\right)^2}}, \quad (3)$$

где  $\varepsilon$  - диэлектрическая проницаемость и  $\sigma$  - проводимость плазмы,  $\omega = 2\pi f$ ,  $f$  – частота радиосигнала.

Траекторные расчеты и оценка неотклоняющего поглощения в D-, E- и F-слоях ионосферы нагревной волны проводились в приближении геометрической оптики для слоистой ионосферы. В основу вычислений взяты формулы для показателей преломления и поглощения коротких радиоволн с учетом влияния магнитного поля и частоты соударений электронов [7]. При определении затухания напряженности поля волны вдоль траектории распространения в ионосфере, важно использовать

правильные частоты столкновений электронов  $v_e$ . При расчете следует учитывать вариации частот столкновений электронов с ионами  $v_{ei}$  и нейтральными молекулами  $v_{en}$  в зависимости от местного времени, сезона, широты и солнечного цикла. Эти изменения могут привести к различиям порядка 30% в общем ионосферном затухании [8]. При расчете поглощения текущие параметры описания высотных распределений концентрации  $N_e(h)$  и температуры  $T_e(h)$  электронов ионосферы для каждого эксперимента определялись по данным радара некогерентного рассеяния (930 МГц) НР. Для вычисления частот соударений электронов  $v_e(h) = v_{ei} + v_{en}$  использовали известные зависимости, входными параметрами которых являлись данные измерений радара и модели MSIS (<http://nssdc.gsfc.nasa.gov/space/model/models/msis.html>). Расчет затухания электрического поля волны накачки до высоты отражения в ионосфере реализован в среде MatLab.

**Результаты эксперимента** Эксперименты на КВ нагревном комплексе EISCAT/Heating, излучающего волну накачки с обыкновенной (О-мода) или необыкновенной (Х-мода) поляризацией на частоте  $f_H = 7.953$  МГц проводились в дневные часы при спокойных геомагнитных условиях.

На рис.1, в качестве примера, показаны результаты спектральной обработки сигналов радара НР в низкочастотном (а, b, c) и высокочастотном (d) диапазонах 20 октября 2012 г. с 13.30 до 15.00 UT при ступенчатом изменении эффективной мощности излучения  $P_{eff}$  нагревного комплекса и чередовании О/Х-поляризации на частоте 7.953 МГц (е). Вариации во времени максимумов спектральных мощностей S ионных HFIL и плазменных HFPL линий приведены на заданных высотах с максимальными амплитудами S. Шаг интегрирования данных радара по времени – 5 с. Рисунки 1a, 1b, 1c характеризуют изменения во времени спектральных мощностей максимумов ионных линий  $SIL_D$ ,  $SIL_0$ ,  $SIL_U$  (downshifted, nonshifted, upshifted ion lines), 1d - спектральных мощностей максимумов плазменных линий SPL (downshifted plasma lines). Значения SPL и SIL приводятся в относительных единицах. Рассчитанные значения эффективной мощности излучения  $P_{eff}$  и мощности просачивания  $P_{leak}$  с учетом поляризации показаны на рис. 1e. Пошаговое изменение  $P_{eff}$  происходило в течение непрерывного 10-минутного цикла нагрева (длительность излучения на каждой мощности составляла 1 мин).

Рис.1 демонстрирует, что SPL и SIL, возбуждаемые на длительных интервалах цикла нагрева, при О-нагреве наблюдаются при более высоких значениях  $P_{eff}$ , чем при Х-нагреве. Мощности SPL и SIL при Х-нагреве на 1–3 порядка выше, чем при О-нагреве. Отметим также, что несмещенный относительно нуля максимум ионных линий  $SIL_0$  наблюдался только при использовании волны накачки с Х-модой поляризации.

Рассмотрим конкретный пример влияния изменений высотного распределения  $N_e(h)$  и  $T_e(h)$  на напряженность электромагнитного поля волны накачки  $E_{ion}$  на ионосферных высотах слоя F2. Анализ представленных на рис.1 данных показывает, что в цикле нагрева с Х-модой поляризации 13:46 – 13:56 UT возбуждение HFPL начались на 1-й минуте цикла ( $P_{eff} = 62.7$  МВт) и HFIL – на 2-й минуте цикла ( $P_{eff} = 198$  МВт), а в цикле 14:16 – 14:26 UT HFPL появились на 2-й минуте цикла ( $P_{eff} = 190.2$  МВт) и ионные линии HFIL – на 3-ей минуте при  $P_{eff} = 316.9$  МВт. По данным ионозонда непосредственно перед началом циклов нагрева (рис.2) можно видеть, что в 14:14 UT на высотах около 90 км наблюдалось возрастание электронной концентрации  $N_e$  по сравнению с моментом 13:44 UT перед циклом 13:46 – 13:56 UT. Результаты вычислений потери напряженности поля волны накачки A по (2, 3) с использованием текущих параметров ионосферы  $N_e(h)$  и  $T_e(h)$  для двух циклов составили соответственно значения  $A \sim 2.8$  дБ и 6 дБ, что привело к изменению  $E_{ion}$ . В цикле 13:46-13:56 UT возрастания SPL начались на 1-й минуте нагрева при  $E_{ion} \sim 0.201$  В/м и

в цикле 14:16-14:26 UT – на 2-ей минуте при  $E_{ion} \sim 0.272$  В/м. Усиления ионных линий в цикле 13:46 – 13:56 UT наблюдались на 2-ей минуте цикла при  $E_{ion} \sim 0.358$  В/м и в цикле 14:16-14:26 UT – на 3-ей минуте при  $E_{ion} \sim 0.353$  В/м. Минимальные значения  $E_{ion}$  для возбуждения ленгмюровских волн волнами накачки с X-модой поляризации для данных циклов составили 0.2–0.3 В/м и для ионных линий более высокие значения 0.35 – 0.36 В/м.

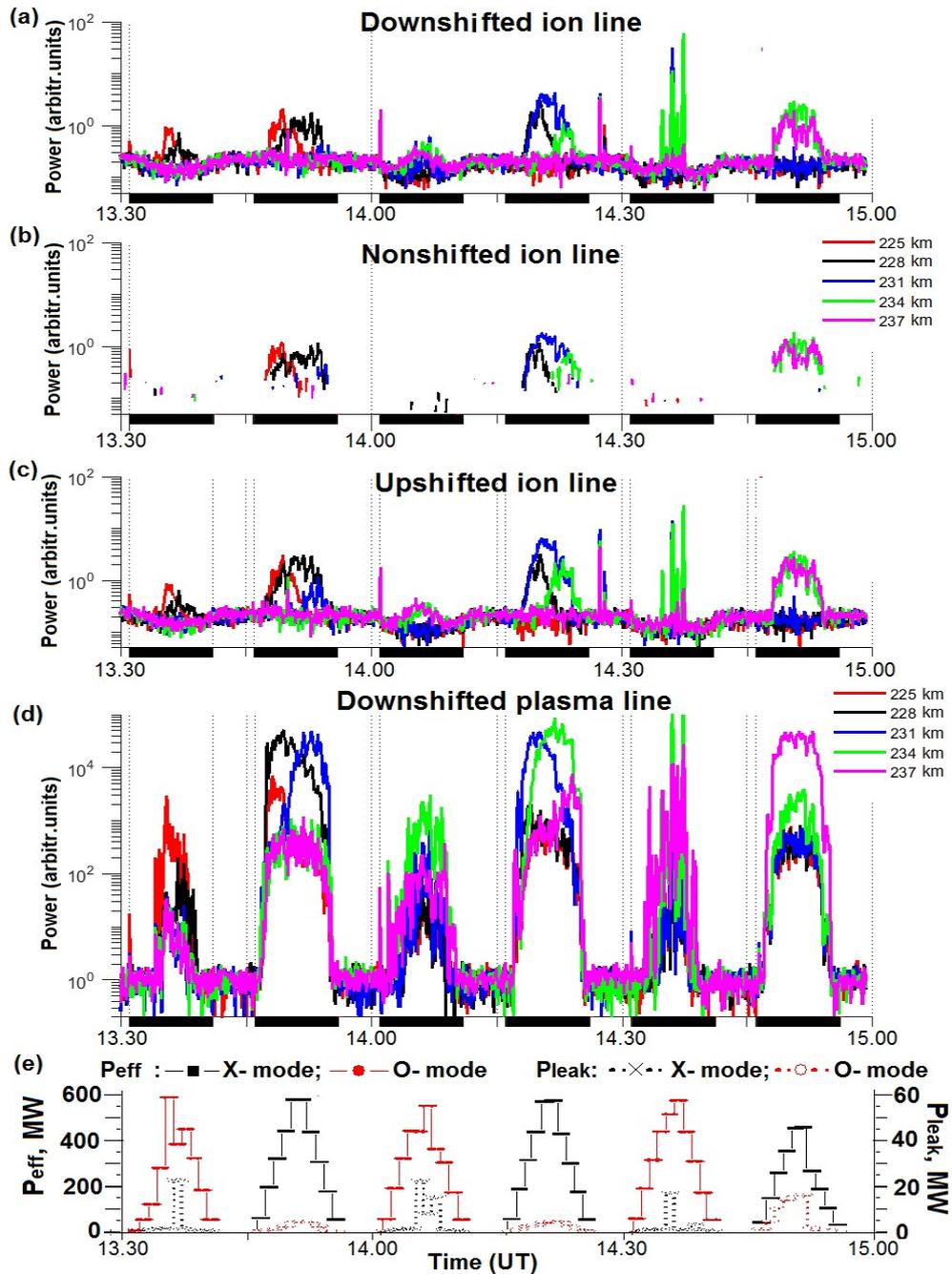


Рис.1. Данные наблюдений радаром НР (930 МГц) 20 октября 2012 г. с 13.30 до 15.00 UT. Вариации мощностей спектральных максимумов на заданных высотах: усиленных нагревом ионных (а –  $SIL_D$ , б –  $SIL_0$ , в –  $SIL_U$ ) и инициированных нагревом плазменных (д) волн. Схема изменения мощностей излучения сигнала  $P_{eff}$  и «просачивания»  $P_{leak}$  с учетом поляризации – (е).

29 октября 2015г. эксперимент проводился с 13.00 до 14.00 UT также на частоте  $f_H = 7.953$  МГц в направлении магнитного зенита. Эффективная мощность излучения  $P_{eff}$  комплекса EISCAT/Heating изменялась по схеме 2 мин нагрев и 1 мин пауза в течение 30-минутного цикла нагрева. Поляризация КВ радиоволны (O- или X-мода) переключалась в каждом цикле. Мощности излучения  $P_{eff}$  для цикла с O- модой имели последовательность значений [0 0 0 3 7 13 48 142 292 530] МВт и для цикла с X-модой – [0 0 7 51 89 121 148 296 440 533] МВт. Критическая частота слоя F2,  $f_oF2$ , в течение часа снижалась от 8.9 МГц до 7.9 МГц.

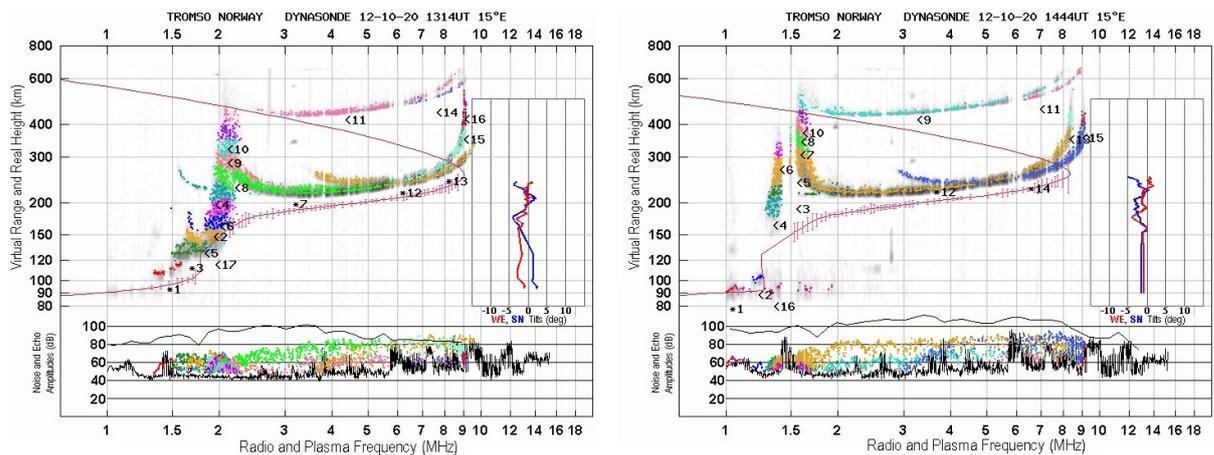


Рис.2. Ионограммы ВЗ ионосферы, измеренные ионозондом EISCAT/Heating 20 октября 2012 г. в 13.14 и 14.44 UT.

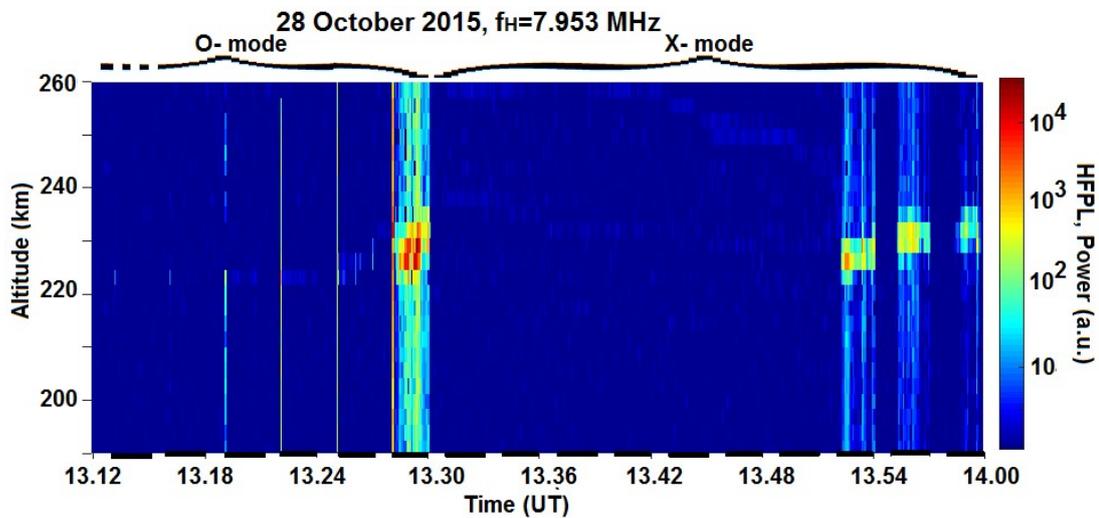


Рис.3. Высотно-временное распределение интенсивностей HFPL по данным измерений EISCAT радара (933 МГц) HP с разрешением 5 с по времени и 3 км по высоте 29 октября 2015 г. O /X нагрев производился в направлении магнитного зенита на частоте 7.953 МГц. Эффективная мощность излучения ступенчато возрастала от 0 до 530 МВт (+2мин/-1мин) в 30 минутном цикле.

На рис.3 приведено пространственно-временное распределение интенсивностей HFPL по данным измерений радара HP с разрешением 5 с по времени и 3 км по высоте для 29 октября 2015 г. При модификации ионосферы O- модой поляризации эффекты возбуждения плазменных линий наблюдались в диапазоне высот 225 – 235 км при  $P_{eff} =$

530 МВт. С учетом рассчитанного затухания  $A = 2.5$  дБ поле волны накачки в ионосфере составляло  $E_{\text{ion}} \sim 0.7$  В/м. В цикле с X-модой поляризации HFPL появились также на высотах 225 – 235 км, но при  $P_{\text{eff}} = 296$  МВт, и при рассчитанном уровне потерь  $A = 7.5$  дБ значение электрического поля было существенно меньше,  $E_{\text{ion}} \sim 0.28$  В/м.

Анализ результатов экспериментов совместно с рассчитанными уровнями потерь волны накачки с использованием текущих параметров ионосферной плазмы на пути распространения до резонансных высот в ионосфере, позволили исследовать условия возбуждения и характеристики ионно-акустических и ленгмюровских плазменных волн в зависимости от уровня электрических полей  $E_{\text{ion}}$  волны накачки в высокоширотной F-области ионосферы. Выполнены оценки минимальных значений электрических полей в ионосфере  $E_{\text{ion}}$  при O/X-нагреве, необходимых для возбуждения ленгмюровской и ионно-акустической турбулентности в F-области высокоширотной ионосферы с учетом неотклоняющего поглощения.

Результаты численных расчетов потери напряженности радиоволны для разных циклов нагрева (с учетом неотклоняющего поглощения в условиях изменчивости фоновой ионосферной плазмы в дневные часы при спокойных геомагнитных условиях) составили для  $f_H = 7.953$  МГц при O-нагреве  $A \sim 1 - 3$  дБ и при X-нагреве  $A \sim 2.8 - 7.5$  дБ. С учетом затухания в нижележащих слоях напряженность электрического поля обыкновенной волны  $E_{\text{ionO}}$  уменьшается в 1.1 – 1.4 раза и необыкновенной волны  $E_{\text{ionX}}$  – в 1.4 – 2.4 раза. Минимальные значения электрического поля  $E_{\text{ionX}}$  на ионосферных высотах, необходимые волнам накачки с необыкновенной поляризацией для возбуждения ленгмюровских волн, составили 0.20–0.30 В/м и ионно-акустических волн – 0.35–0.40 В/м. При X-нагреве возбуждение HFPL начинаются при более низких значениях  $E_{\text{ion}}$  (на  $\sim 0.05$ – $0.10$  В/м ниже), чем начало возрастания мощности усиленных нагревом ионных линий. Значения  $E_{\text{ionX}}$ , необходимые для возбуждения HFPL и HFIL, при нагреве ионосферы волнами накачки с X-модой поляризации в 1.5 – 2 раза ниже, чем пороговые значения  $E_{\text{ionO}}$  при модификации ионосферы с O-модой.

### Литература

1. Гуревич А.В. Нелинейные явления в ионосфере // УФН. 2007. Т. 177. № 11. С. 1145 - 1177.
2. *Blagoveshchenskaya N.F., Borisova T.D., Kalishin A.S. et al.* Distinctive features of Langmuir and Ion-acoustic Turbulences induced by O- and X-mode HF Pumping at EISCAT // J. Geophys. Res.: Space Physics. 2020. V. 125. №7. DOI 10.1029/2020JA028203.
3. *Robinson T. R.* The heating of the high latitude ionosphere by high power radio wave // Phys. Rep. 1989. V. 179. N. 2-3. P.79 - 209.
4. *Stubbe P.* Review of ionospheric modification experiments at Tromsø // J. Atmos. Terr. Phys. 1996. V. 58. N.1-4. P. 349-368.
5. Грач С. М., Караитин А. Н., Митяков Н. А. и др. Параметрическое взаимодействие электромагнитного излучения с ионосферной плазмой // Изв. вузов. Радиофизика. 1977. Т. 20. С. 1827.
6. *Борисова Т.Д., Благовещенская Н.Ф., Йоман Т.К., Хаггстром И.* Влияние эффективной мощности излучения нагревного комплекса EISCAT/Heating на возбуждение искусственных ионосферных турбулентностей в высокоширотной F-области ионосферы // Изв. вузов. Радиофизика. 2017. Т.60. №4. С.305-325.
7. Распространение электромагнитных волн в плазме. *Гинзбург В.Л.* // М. Наука. 1967. 684С.
8. *Zawdie K.A., Drob D.P., Siskind D.E., Coker C.* Calculating the absorption of HF radio waves in the ionosphere // Radio Sci. 2017. V.52. P.767–783. doi:10.1002/2017RS006256.